

*Мартынова*

Мартынова Юлия Валерьевна

**Математическое моделирование  
климатических характеристик для территории  
Сибири в условиях климатических изменений**

Специальность 05.13.18 –

Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2011

**Работа выполнена** в Учреждении Российской академии наук Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Крупчатников Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Гордов Евгений Петрович  
кандидат физико-математических наук  
Елисеев Алексей Викторович

Ведущая организация: ГУ «Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова»

Защита состоится 31 мая 2011 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 003.061.02 при Учреждении Российской академии наук Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан « 20 » апреля 2011 года.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000677023

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 003.061.02,  
д.ф.-м.н.

Сорокин С.Б.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В последние годы большое внимание уделяется проблеме глобальных климатических изменений. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) пришла к выводу, что одной из причин глобальных изменений климата в течение последнего столетия является интенсивное развитие промышленности, способствующее увеличению выбросов в атмосферу продуктов сжигания углеродного топлива, что приводит к увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере. Кроме того, МГЭИК склонны считать, что рост концентрации  $\text{CO}_2$  оказывает значительное влияние на глобальную температуру воздуха. Изменение глобальной температуры может оказывать влияние на характеристики подстилающей поверхности, вследствие чего может измениться характер обратных связей, существующих между различными климатическими параметрами. В частности, под воздействием потепления могут быть затронуты процессы характерные именно для территории Сибири.

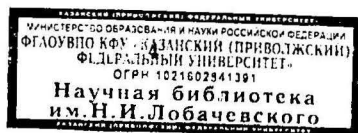
Существует ряд обстоятельств объясняющих интерес научного сообщества к исследованию изменения климатических процессов, происходящих на территории Сибири. Во-первых, за счет большой площади (около 10 млн. км<sup>2</sup>) Сибирь отличается разнообразием сочетаний климатообразующих факторов. Во-вторых, значительная часть территории Сибири занята лесными и болотными угодьями, которые за счет эмиссии и аккумуляции основных парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и др.) играют важную климаторегулирующую роль в глобальном масштабе. В-третьих, территория Сибири хороша для выявления роли природных и антропогенных факторов в наблюдаемых климатических изменениях за счет присутствия на данной территории разнообразных климатических зон, а также наличия областей с высокой и совсем отсутствующей техногенной нагрузкой. Помимо перечисленных обстоятельств существует еще одно важное основание для климатических исследований для территории Сибири: повышенные, в сравнении с многими другими регионами, наблюдаемые темпы потепления. В 2000 году группой авторов во главе с М.В. Кабановым была опубликована статья, в которой было показано, что за 1955–1990 годы средняя по территории температура воздуха у поверхности Сибири увеличивалась со скоростью от 0.2°C/10 лет до 0.5°C/10 лет в зависимости от области. Кроме того, по данным МГЭИК за 1974–2000 годы скорость роста температуры в северных широтах (в частности в Сибири) достигает 0.8–1.0°C/10 лет, при этом скорость роста температуры нижних слоев атмосферы в Северной Америке и в Европе составляет 0.3°C/10 лет и 0.4°C/10 лет, соответственно, а в районе экватора — менее 0.1°C/10 лет.

Для исследования климатических изменений широко используются данные наблюдений. С их помощью исследуются закономерности современных природно-климатических изменений, атмосферная циркуляция и грозовая активность; ведутся исследования болотных угодий Сибири, а также современные изменения температуры почвы и влияние глобального потепления на динамику эволюции криолитозоны. По данным наблюдений

можно оценивать тренды происходящих изменений и прогнозировать дальнейшее развитие изменений на относительно короткие промежутки времени. Также можно исследовать поведение отдельно взятых параметров, но ни существующие и возникающие обратные связи между ними. В этом случае на помощь приходит моделирование. Например, моделирование широко используется при проведении различных исследований для территории Сибири. Исследуются температурный и гидрологический режимы водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты, влияние скорости глобального потепления на таяние вечной мерзлоты, а также изменения различных климатических процессов и характеристик, связанных с глобальным потеплением. Из-за деградации вечной мерзлоты происходят изменения в болотных экосистемах, в частности, происходят изменения эмиссии метана, что также активно исследуется. Кроме того, ведутся исследования влияния солнечной и вулканической активности на климатические изменения, происходящие вследствие антропогенного влияния. Исследуются возможные изменения экстремальности термического режима и условий пожароопасности.

Хотя для территории Сибири проводится большое количество исследований, тем не менее стоит отметить, что эти исследования затрагивают далеко не все климатические аспекты. Например, недостаточное внимание уделяется исследованию обратных связей. Исследования обратных связей ведутся, в основном, в глобальных масштабах, без учета глобальных изменений климата, и при использовании моделей, не учитывающих влияние растительности. Существуют также исследования влияния влажности поверхности на количество осадков, но в процессе исследований не рассматривается влияние влажности поверхности отдельных регионов, так как исследования проводятся только в глобальном масштабе. Кроме того, ведутся исследования влияния величины осеннего снежного покрова на зимнюю приземную температуру. Однако эти исследования не учитывают экстремальных величин снежного покрова, которые могут иметь место в случае глобальных климатических изменений, что приводит к невозможности выделения условий, при которых влияние проявляется наиболее сильно. Данная диссертационная работа посвящена исследованию обратных связей, существующих между атмосферой и поверхностью суши.

Для исследований, проводимых в рамках данной работы, была использована глобальная крупномасштабная модель промежуточной сложности «Planet Simulator» разработанная в Метеорологическом институте Гамбургского университета, состоящая из нескольких вычислительных блоков: атмосферного, океанического, биосферного, поверхности суши и морского льда. Данная модель может использоваться на широком спектре временных масштабов. В рамках данной работы использовался ансамблевый подход, характеризующийся проведением моделирования с использованием одной модели с различными начальными условиями. Данный подход позволяет исключить зависимость результата от начальных условий.



**Целью** данной работы является исследование для территории Сибири влияния характеристик подстилающей поверхности на характеристики атмосферы при возможных глобальных изменениях климата.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать обратные связи между вариацией лесной растительности и приземной температурой воздуха, а так же между вариацией лесной растительности и влажностью подстилающей поверхности.
2. Исследовать влияние влажности подстилающей поверхности на количество осадков.
3. Исследовать влияние аномалий осеннего снежного покрова на температуру воздуха у поверхности Сибири в зимний период.
4. Разработать комплекс программ для проведения необходимых численных экспериментов и поддержки исследований в целом.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Создан программный комплекс, состоящий из глобальной крупномасштабной модели климатической системы (разработана в Метеорологическом институте Гамбургского университета), адаптированного автором данной диссертационной работы для решения поставленных задач, и пакета программ для анализа и визуализации результатов моделирования, разработанного непосредственно автором данной диссертации.
2. Результаты качественной оценки влияния вариации лесной растительности на температуру и влажность подстилающей поверхности.
3. Результаты математического моделирования влияния влажности подстилающей поверхности на количество осадков.
4. Результаты математического моделирования влияния аномалий осеннего снежного покрова на приземную температуру воздуха в зимний период.

**Научная новизна:**

1. Впервые для территории Сибири дана оценка значений параметров обратных связей между лесной растительностью и приземной температурой воздуха и влажностью поверхности с использованием климатических сценариев.
2. Впервые для территории Сибири с использованием климатических сценариев была определена степень влияния влажности подстилающей поверхности данной территории на количество осадков, выпадающих на ней.
3. Было выполнено оригинальное исследование влияния осеннего снежного покрова территории Сибири на зимнюю приземную температуру воздуха данной территории в условиях экстремальных значений величины снежного покрова.

**Научная и практическая значимость** диссертационной работы определяется результатами проведенных исследований, которые позволяют лучше понять механизмы взаимодействия подстилающей поверхности и атмосферы для территории Сибири, могут применяться при разработке новых моделей, а так же для модификации существующих глобальных и региональ-

ных климатических моделей; кроме того, могут быть полезны при разработке методов сезонных прогнозов погоды. Представленные в диссертационной работе исследования выполнялись по проектам, поддержанным Российским фондом фундаментальных исследований (№№ 05-05-64989, 08-05-00457), что подтверждает их научную значимость.

**Степень достоверности** полученных результатов обеспечивается применением современной климатической модели и современных методов исследования. Возможные интервалы неопределенности в оценках климатических характеристик были уточнены за счет использования ансамблевого подхода. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на: Генеральной ассамблее Европейского геонаучного объединения «EGU-2009» (Австрия, Вена 2009), Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2008» (Томск 2008), Международной конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES» (Томск 2007, Красноярск 2009), Сибирском совещании по климато-экологическому мониторингу (VIII, Томск 2009), Всероссийской конференции «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» (XI, Нижний Новгород 2007).

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие на этапе постановки задач и планирования численных экспериментов. Кроме того, автором была осуществлена настройка и интеграция крупномасштабной климатической модели промежуточной сложности в общий исследовательский процесс, проведено численное моделирование с использованием данной модели, проведены численные исследования и анализ полученных результатов, а также разработано необходимое программное обеспечение.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 10 — в тезисах докладов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации 121 страница текста с 22 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 140 наименований.

## **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена оценке обратных связей между вариацией лесной растительности и температурой, а также влажностью подстилающей поверхности. Изменение количества лесной растительности, посредством

изменения альбедо поверхности, вызывает изменение баланса длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы, что, в свою очередь, вызывает изменение температуры и влажности подстилающей поверхности, и, как следствие, влияет на количество лесной растительности. На взаимодействие указанных параметров может значительное влияние оказывать фоновое состояние атмосферы, в частности концентрация углекислого газа. При увеличении в атмосфере концентрации углекислого газа включаются механизмы роста растительности, в том числе и лесной, таким образом, динамика развития лесной растительности приобретает нелинейный характер.

Исследования проводились для двух климатических сценариев (см. Рис. 1). Для первого климатического сценария была характерна постоянная концентрация углекислого газа, составляющая 360 ppm. В качестве второго климатического сценария был выбран самым агрессивный определенный МГЭИК сценарий — A2 (концентрация CO<sub>2</sub> экспоненциально растет, начиная с 360 ppm). Для определения коэффициента обратных связей между вариацией лесной растительности и температурой и влажностью подстилающей поверхности была использована методика Soden B.J. и Held I.M., предложенная в 2006 году. Для ее применения было осуществлено два прогона модели «Planet Simulator»: базовый, длительностью 90 модельных лет, и дополнительный, где была сделана привязка модели к полю среднего количества лесной растительности увеличенной на 10%. После чего коэффициенты обратных связей между вариацией лесной растительности и температурой,  $T_s$ , и влажностью подстилающей поверхности,  $q_s$ , были вычислены, как

$$\lambda_{T_s} = K_x \frac{dx}{dT_s}, \quad \lambda_{q_s} = K_x \frac{dx}{dq_s},$$

где

$$K_x = \frac{\partial R}{\partial x}, \quad \frac{dx}{dT_s} = \frac{x^{<end>} - x^{<begin>}}{\bar{T}_s^{<end>} - \bar{T}_s^{<begin>}}, \quad \frac{dx}{dq_s} = \frac{x^{<end>} - x^{<begin>}}{\bar{q}_s^{<end>} - \bar{q}_s^{<begin>}},$$

$R$  — баланс длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы.

Исследуемая область располагается между 52° и 73° с.ш., и 60° и 90° в.д., горизонтальное пространственное разрешение составляет 5.6° x 5.6°, вертикальное — 5 атмосферных  $\sigma$ -уровней (1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2) и 5 уровней в почве (0.4 м, 0.8 м, 1.6 м, 3.2 м, 6.4 м), шаг по времени составлял 30 минут.

Численные исследования с применением модели промежуточной сложности климатической системы «Planet Simulator» показали, что при использовании агрессивного сценария антропогенного воздействия A2 абсолютная величина коэффициентов обратных связей между вариацией лесной растительности, с одной стороны, и приземной температурой воздуха и влажностью поверхности — с другой, значительно меньше, чем абсолютная величина рассматриваемых коэффициентов в случае использования контрольного сценария. Полученный результат свидетельствует о значительном влиянии роста концентрации углекислого газа в атмосфере на значения характеристик рассматриваемых обратных связей. Коэффициенты обратных

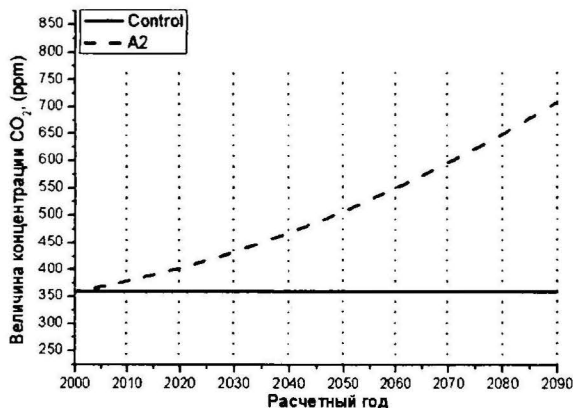


Рис. 1: Концентрация  $\text{CO}_2$ , контрольный сценарий (Control) и сценарий A2.

связей между вариацией лесной растительности и приземной температурой воздуха и влажностью поверхности имеют противоположные знаки (в случае каждого отдельно взятого сценария). При изменении климатического сценария с контрольного на агрессивный (A2) обнаружено смещение очагов положительного и отрицательного влияния среднего количества лесной растительности на характеристики, указанные в предыдущем выводе.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния влажности подстилающей поверхности на количество осадков. Влияние изменения количества осадков на изменение влажности почвы очевидно: сильные дожди делают почву значительно более влажной, в то время как в засушливые периоды почва становится более сухой. Влияние же влажности почвы на количество осадков не так очевидно. Можно предположить, что более влажная почва способствует усилению испарения влаги с ее поверхности, которое, в свою очередь, способствует увеличению количества осадков посредством возникших изменений локальных и крупномасштабных атмосферных циркуляций. Но будет ли это влияние носить локальный характер или же будет распространяться на области, расположенные вблизи области с высокой влажностью, — не вполне понятно. В данной главе внимание сосредоточено на исследовании влияния влажности поверхности территории Сибири на количество осадков, выпадающих на этой же территории.

При проведении исследования влияния влажности почвы на количество осадков за основу была взята методика, описанная в 2002 году в работе R. Koster и др. Эксперимент состоит из двух этапов. На первом этапе запускается модель «Planet Simulator» на заданный период времени. На каждом временном шаге значение влажности почвы в каждом узле сетки



записывается в файл (результат W1). Эта операция повторяется еще девять раз, используя девять различных начальных состояний атмосферы и влажности почвы, полученных путем внесения малых возмущений относительно базового состояния (результаты W2–W10). Таким образом, получается ансамбль из результатов десяти запусков модели (W1–W10). Важно обратить внимание, что в файл записываются значения влажности почвы, полученные только в результате первого запуска модели. На втором этапе эксперимента создается другой ансамбль, состоящий также из десяти результатов запуска модели «Planet Simulator» (R1–R10). Члены этого ансамбля отличаются друг от друга только начальными состояниями атмосферы. На каждом временном шаге в процессе каждого моделирования влажность почвы заменяется на соответствующую по времени влажность почвы из файла, в котором хранится результат W1. Таким образом, все члены ансамбля R имеют одинаковое значение влажности почвы на протяжении всего второго этапа. Идея данного эксперимента проста, и заключается в исследовании степени схожести временных рядов количества осадков, полученных в результате второго этапа эксперимента (R1–R10). Если они схожи даже после исключения влияния начального состояния атмосферы при помощи анализа результатов первого этапа эксперимента (W1–W10), то можно утверждать, что атмосферные изменения в значительной степени обусловлены влиянием влажности подстилающей поверхности.

Описываемый эксперимент проводился для двух климатических сценариев (см. Рис. 1): контрольного и A2. Рассматривалось два типа осадков: конвективные и крупномасштабные. Для каждого сценария и каждого типа осадков были созданы ансамбли W1–W10 и R1–R10. Продолжительность каждого моделирования в рамках ансамбля составляет 70 модельных лет. К рассмотрению принимались только летние месяцы (июнь, июль и август). Моделирование проводилось с использованием модели «Planet Simulator». Исследуемая область располагается между 52° и 73° с.ш., и 60° и 90° в.д., горизонтальное пространственное разрешение составляет 5.6° x 5.6°, вертикальное — пять атмосферных  $\sigma$ -уровней (1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2) и пять уровней в почве (0.4 м, 0.8 м, 1.6 м, 3.2 м, 6.4 м), шаг по времени – 30 минут. Результатом моделирования выступали среднесуточные значения крупномасштабных и конвективных осадков, записываемые каждые модельные сутки в файл.

Для дальнейшего определения степени схожести временных рядов количества осадков в соответствии с используемой методикой был выбран трехдневный период агрегации осадков. Для каждого периода было вычислено среднее количество осадков ( $P$ ). За три рассматриваемых месяца получилось тридцать трехдневных средних значений осадков в пределах каждого расчетного года. Для каждого трехдневного периода ( $n$ ) в каждом узле расчетной сетки было вычислено среднее значение по ансамблю среди  $P$  ( $\hat{P}_n$ ). Степень схожести временных рядов осадков вычислялась

по методике, предложенной в 2000 году R. Koster и соавторами:

$$\Omega_P = \frac{10\sigma_{\hat{P}}^2 - \sigma_P^2}{9\sigma_P^2}.$$

Дисперсии  $\sigma_{\hat{P}}^2$  и  $\sigma_P^2$  вычислялись, как:

$$\sigma_P^2 = \frac{1}{30} \sum_{n=1}^{30} \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (P_{ni} - \bar{P})^2, \quad \sigma_{\hat{P}}^2 = \frac{1}{30} \sum_{n=1}^{30} (\hat{P}_n - \bar{P})^2,$$

где

$$\bar{P} = \frac{1}{30} \sum_{n=1}^{30} \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} P_{ni}.$$

Здесь  $i$  пробегает по всем членам ансамбля (десять значений).

Если каждый член ансамбля совпадает с некоторым временным рядом  $P$ , то  $\sigma_P^2$  будет равна  $\sigma_{\hat{P}}^2$ , и, следовательно,  $\Omega_P$  будет равна 1. Однако, если временные ряды совершенно не коррелируют, то  $\sigma_{\hat{P}}^2$  будет примерно равна  $\sigma_P^2/10$ , и тогда  $\Omega_P$  будет равна 0. Таким образом, значение  $\Omega_P$  варьируется от 0 до 1. Чем ближе значение  $\Omega_P$  к 1 тем более схожи временные ряды, и наоборот, чем ближе значение  $\Omega_P$  к 0, тем временные ряды менее схожи. Кроме того, необходимо отметить, что соотношение сигнал/шум величина  $\Omega_P$  измеряет в условиях общей изменчивости системы. Для определения влияния влажности почвы на количество осадков рассматривается абсолютное значение  $\Omega_P(R) - \Omega_P(W)$ , где  $\Omega_P(R)$  — значение  $\Omega_P$  вычисленное для ансамбля  $R$ , а  $\Omega_P(W)$  — значение  $\Omega_P$  вычисленное для ансамбля  $W$ . Величина  $|\Omega_P(R) - \Omega_P(W)|$  может принимать значения от 0 до 1. Чем ближе ее значение к 1, тем большее влияние оказывает влажность почвы на количество осадков.

Математическое моделирование, проведенное для территории Сибири, показало что в среднем для территории Сибири влажность поверхности рассматриваемой территории слабо влияет на количество как крупномасштабных, так и конвективных осадков, выпадающих на данной территории. Быстрый рост концентрации углекислого газа в атмосфере (при агрессивном сценарии антропогенного воздействия А2) значительно ослабляет влияние влажности поверхности на количество крупномасштабных осадков, а влияние влажности поверхности на количество конвективных осадков значительно усиливает.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния аномалий осеннего снежного покрова на температуру воздуха у поверхности Сибири в зимний период. По данным спутниковых наблюдений Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) именно в октябре в Сибири происходит основное формирование снежного покрова. Кроме того, в течение октября в Сибири происходит смена сезонов, перестроение поведения климатической системы. Следовательно, величина сформировавшегося

в октябре снежного покрова может оказывать значительное влияние на формирование процессов, определяющих состояние климатической системы в последующий зимний период.

Для проведения исследований влияния изменения площади осеннего снежного покрова на зимнюю приповерхностную температуру воздуха за основу была взята идея, предложенная в 2003 году G. Gong и др. Исследования базировались на результатах численного моделирования, полученных при помощи глобальной крупномасштабной модели «Planet Simulator». Исследуемая область располагается между 52° и 73° с.ш., и 60° и 90° в.д., горизонтальное разрешение модели составляло 5.6° x 5.6°, рассматривалось 25 вертикальных  $\sigma$ -уровней, равномерно распределенных от поверхности земли до высоты, соответствующей десяти миллибарам. Шаг по времени составлял 10 минут модельного времени. Результатом моделирования являлись пространственные поля приземной температуры воздуха, осредненные за каждый зимний месяц в отдельности. При моделировании рассматривались две климатические ситуации: 1) количество снега в октябре на территории Сибири аномально велико (снегом покрыто 80 % территории, а средняя глубина снега по рассматриваемой территории, выраженная в водном эквиваленте за октябрь составляет 0.04 м); 2) количество снега в октябре на рассматриваемой территории аномально мало (снегом покрыто 57 % территории, а средняя глубина снега по рассматриваемой территории, выраженная в водном эквиваленте за октябрь составляет 0.03 м). Для каждой ситуации проводилось по двадцать запусков модели, причем для каждого запуска в начальные данные о глубине и площади снежного покрова в октябре вносились случайные нормально распределенные возмущения. Набор вносимых возмущений одинаков для обеих ситуаций. Результаты моделирования были объединены в два ансамбля, отличающихся базовыми средними значениями глубины и площади снежного покрова: 1) «максимум-ансамбль» — для первой рассмотренной климатической ситуации; 2) «минимум-ансамбль» — для второй. Построенные ансамбли дают возможность оценить насколько сильно влияет площадь и толщина снежного покрова территории Сибири в октябре на приповерхностную температуру воздуха зимних месяцев.

Одна из основных проблем, которая возникает при анализе результатов численных экспериментов, проводимых при помощи моделей общей циркуляции, — это оценка статистической значимости полученного отклика рассматриваемой климатической системы на вносимые в начальные условия возмущения. В настоящей главе для оценки значимости вносимых возмущений была вычислена  $t$ -статистика Стьюдента.

Для исследования наличия связи между величиной снежного покрова территории Сибири в октябре и приземной температурой воздуха в зимние месяцы был рассчитан индекс корреляции Пирсона между приземной температурой воздуха и средней по Сибири глубиной, а также площадью, снежного покрова.

Подтверждена значимость эксперимента для построенных «максимум-ансамбля» и «минимум-ансамбля» для двух из трех рассматриваемых меся-

цев: декабря и февраля. Анализ результатов математического моделирования проведенного с использованием глобальной крупномасштабной модели промежуточной сложности «Planet Simulator» показал, что наиболее сильное влияние глубина и площадь снежного покрова территории Сибири в октябре оказывает на декабрьскую приземную температуру воздуха. Изменение глубины снежного покрова территории Сибири особенно сильно влияет на приземную температуру воздуха зимних месяцев в условиях экстремально большой величины снежного покрова, а влияние изменения площади снежного покрова наиболее сильно проявляется в условиях экстремально малой величины снежного покрова. Географическое положение областей соответствующих более высоким значениям индекса корреляции совпадает с областями статистической значимости возмущений, вносимых в начальные условия при построении ансамблей. Описан возможный механизм взаимодействия тропосферы и стратосферы, посредством которого осуществляется влияние изменения величины снежного покрова на температуру поверхности в зимний сезон.

В **четвертой главе** приведено описание созданного программного комплекса для расчетов и визуализации, объединяющего в себе глобальную крупномасштабную модель промежуточной сложности «Planet Simulator», разработанную в Метеорологическом институте Гамбургского университета, и пакет программ для анализа результатов моделирования, разработанного автором данной диссертационной работы. Модель воспроизводит все необходимые для исследований климатообразующие процессы, имеет открытый код, нетребовательна к аппаратному обеспечению. В исходный код модели была добавлена возможность динамического изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере на основе заданных в отдельном файле данных. Это позволило проводить моделирования в условиях экспоненциально растущей концентрации углекислого газа в атмосфере. Кроме того, в исходный код модели была добавлена возможность считывания из файла конкретных значений необходимых параметров на каждом временном шаге модели, что позволило проводить эксперименты, требующих задания в процессе моделирования определенных значений каким-либо параметрам. Таким образом, модель «Planet Simulator» была адаптирована для необходимых исследований, проводимых в рамках поставленных задач. Разработанный пакет программ для анализа результатов моделирования состоит из ряда модулей, реализующих методику вычисления коэффициентов обратных связей между вариацией лесной растительности и температурой и влажностью подстилающей поверхности, методику вычисления значения индекса когерентности — для исследования влияния влажности почвы на количество осадков, а также методику определения статистической значимости возмущений и вычисления полей корреляции — для исследования влияния аномалий осеннего снежного покрова на температуру воздуха у поверхности территории Сибири в зимний период, и модулей, реализующих предварительную обработку результатов моделирования и представление результатов в графическом виде.

Модули, реализующие предварительную обработку результатов моделирования, методики вычисления коэффициентов обратных связей, а также

методики вычисления значения индекса когерентности, были разработаны при использовании языка программирования Фортран 90 с использованием свободно распространяемой среды Eclipse Ganymede 3.4.0 и компилятора GNU Fortran compiler. Язык программирования Фортран является стандартом де-факто для математических вычислений, чем и обусловлен его выбор в данной работе. Среда разработки Eclipse Ganymede была выбрана, исходя из ее кроссплатформенности и свободы распространения. Разработка модуля, реализующего методику определения статистической значимости возмущений, вычисления полей корреляции, а также представление всех результатов в графическом виде в формате Encapsulated Postscript, осуществлялись с помощью языка ITTVIS Interactive Data Language 7.0 (IDL). Выбор языка IDL обусловлен наличием в нем обширной библиотеки процедур для математической и графической обработки данных.

В тексте диссертации для каждого модуля приведены блок-схемы, демонстрирующие принципы их работы, а также подробное описание входных и выходных данных. Гибкая структура комплекса программ позволяет быстро менять различные параметры обработки данных, что дает возможность для проведения дальнейших исследований, а также для развития данного комплекса путем добавления в него новых модулей.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем.

1. На основе анализа результатов моделирования было получено, что глобальные изменения климата, обусловленные ростом концентрации углекислого газа в атмосфере могут оказывать значительное влияние на величину интенсивности обратных связей между вариацией лесной растительности, с одной стороны, и приземной температурой воздуха и влажностью поверхности — с другой.
2. Численные исследования с применением модели «Planet Simulator» показали, что влажность поверхности в конкретной точке территории Сибири не является основным фактором, оказывающим влияние на количество осадков, выпадающих в этой же точке на данной территории. Вместе с тем, климатические изменения, обусловленные быстрым ростом концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере (при агрессивном сценарии антропогенного воздействия на систему — A2), оказывают значительное воздействие на влияние влажности подстилающей поверхности Сибири на количество осадков: происходит ослабление влияния на количество крупномасштабных осадков, и усиление его на количество конвективных.
3. Математическое моделирование, проведенное для территории Сибири показало, что наиболее сильное влияние снежный покров, сформировавшийся в октябре, оказывает на декабрьскую приземную температуру воздуха. При этом в условиях экстремально большой величины снежного покрова на приземную температуру воздуха зимних месяцев наиболее сильное влияние оказывает изменение глубины снежного покрова, а в условиях экстремально малой — изменение площади.

4. Для выполнения поставленных задач был создан программный комплекс для расчетов и визуализации состоящий из двух основных частей: глобальной крупномасштабной модели климатической системы «Planet Simulator», разработанной в Метеорологическом институте Гамбургского университета, и адаптированного автором данной диссертационной работы для решения поставленных задач, а также пакета программ для анализа результатов моделирования, разработанного непосредственно автором данной диссертации. Созданный комплекс нетребователен к аппаратным ресурсам, и, при необходимости, может быть легко перенесен с одной аппаратной платформы на другую. Гибкая структура комплекса программ позволяет быстро менять различные параметры обработки данных, что позволяет расширять разработанный программный комплекс путем добавления в него новых модулей.

Ход и характер климатических процессов на территории Сибири проявляют высокую чувствительность к глобальным изменениям климата, что подтверждает важность проводимых исследований.

### **Публикации автора по теме диссертации**

1. *Martynova Yu.* Estimation of influence of a variation of vegetation of Northern hemisphere on dynamics of temperature and humidity during 21 century. // Тезисы докладов Международной конференции и школы молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2007». — Томск: ИМКЭС СО РАН, 2007. — С. 74.
2. *Мартынова Ю.В.* Оценка влияния вариации растительности Северного полушария на динамику температуры и влажности в 21 веке. // Вычислительные технологии, 2007. — Том 13. — С. 124-129.
3. *Martynova Yu.* Study of soil humidity influence on summer precipitation quantity against the background of CO<sub>2</sub>concentration increase for Western Siberia. // Тезисы докладов Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2008». — Томск: ИМКЭС СО РАН, 2008. — С. 92.
4. *Лыкосов В.Н., Крупчатников В.Н., Кузин В.И., Голубева Е.Н., Платов Г.А., Крылова А.И., Мартынова Ю.В.* Оценка обратных связей в климатической системе Северной Евразии и Арктики при воздействии глобальных климатических изменений. // Тезисы докладов Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2008». — Томск: ИМКЭС СО РАН, 2008. — С. 84.
5. *Martynova Yu., Krupchatnikov V.* Estimation of anomaly soil humidity influence on anomaly summer precipitation for Western Siberia. // Abstracts of European Geosciences Union General Assembly «EGU-2009». — Vienna: 2009r. — Geophysical Research Abstracts, V. 11, EGU2009-354.
6. *Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н.* Исследование нестационарной реакции циркуляции атмосферы к сезонной аномалии источника на поверхности территории Сибири с использованием модели общей циркуляции

- атмосферы. // Тезисы Всероссийской конференции по вычислительной математике. — Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2009.
7. *Martynova Yu.* Estimation of feedbacks between vegetation variations and surface temperature and humidity for Siberia. // Тезисы Международной конференции и школы молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2009». — Красноярск: ИМКЭС СО РАН, 2009. — С. 86.
  8. *Krupchatnikov V., Martynova Yu.* Connection between NAO/AO, surface climate over Northern Eurasia under global changes: possible mechanism. // Тезисы Международной конференции и школы молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2009». — Красноярск: ИМКЭС СО РАН, 2009. — С. 33.
  9. *Krupchatnikov V., Martynova Yu.* Study of vegetation dynamics in Northern Eurasia climate system on the base of coupled model ocean-atmosphere-vegetation-soil under global climate changes: Scenario A2. // Тезисы Международной конференции и школы молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2009». — Красноярск: ИМКЭС СО РАН, 2009. — С. 82.
  10. *Кузин В.И., Крупчатников В.Н., Голубева Е.Н., Платов Г.А., Крылова А.И., Фоменко А.А., Мартынова Ю.В., Боровко И.* Гидрологические обратные связи Северной Евразии и Арктического бассейна и изменение климатических режимов. // Тезисы Международной конференции и школы молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES-2009». — Красноярск: ИМКЭС СО РАН, 2009. — С. 34.
  11. *Крупчатников В.Н., Кузин В.И., Голубева Е.Н., Мартынова Ю.В., Платов Г.А., Крылова А.И.* Исследование гидрологии и динамики растительности климатической системы северной Евразии Арктического бассейна. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2009. — Т. 45, № 1. — С. 123–144.
  12. *Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н.* Исследование чувствительности Северо-Атлантического колебания к изменению площади снежного покрова территории Сибири. // Тезисы VIII Сибирского совещания по климато-экологическому мониторингу. — Томск: ИМКЭС СО РАН, 2009. — С. 101–102.
  13. *Кузин В.И., Крупчатников В.Н., Голубева Е.Н., Мартынова Ю.В., Платов Г.А.* Исследование динамики климатической системы Северной Евразии и Арктического бассейна. // Сибирский журнал вычислительной математики, 2009. — Том 12, №3. — С. 289–295.
  14. *Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н.* Исследование чувствительности температуры поверхности в Евразии в зимний период к аномалиям снежного покрова. Роль стратосферы. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2010. — Т. 46, № 6. — С. 1–13.



10 з

Издательство Томского ЦНТИ. Лицензия ИД № 05060 от 14.06.2001 г.  
Подписано в печать 05.04.2011 г. Формат 60х84 1/16.  
Бумага офсетная № 1. П.л. 1,0. Заказ № 357. Тираж 110 экз.  
Отпечатано в Томском ЦНТИ. Лиц. ПД № 12-0084 от 16.04.2001 г.  
Россия, 634021, г.Томск, пр.Фрунзе, 115/3.